



Descripción, Funcionamiento y Futuras Aplicaciones de los Riblets como Método para Reducir las Fuerzas de Fricción

Description, Operation and Future Applications of Riblets as a Method to Reduce
Friction Forces

Alejandro Alonzo García^a, Enrique Chan y Díaz^a, Claudia Gutiérrez Torres^b, Oscar
Morales Contreras^c, Antonio Gómez Roa^{c,*}

^aInstituto Tecnológico de Mérida - ^bInstituto Politécnico Nacional - ^cUniversidad Autónoma de
Baja California. *Corresponding author: gomez_roa@uabc.edu.mx

Abstract— This paper presents the background, theoretical modeling, operation and the current outlook of the use of riblets as a passive method for turbulent drag reduction. Some explanations of the mechanism involved obtained under different perspectives are also discussed. Furthermore, it is suggested the application of the method to bodies whose surfaces are affected by pressure and friction forces because of the better performance of the technique reported in recent research.

Keywords— Riblets, turbulent flow, drag reduction, pressure forces, friction forces.

Resumen— El siguiente trabajo presenta los antecedentes históricos, el modelado teórico, el funcionamiento y el panorama actual del empleo de riblets como un método pasivo para la reducción del arrastre por fricción en flujos turbulentos. Se presentan también algunas explicaciones del mecanismo involucrado obtenidas desde diferentes perspectivas de estudio, y se plantea una aplicación relativamente nueva del método a cuerpos cuyos coeficientes de arrastre depende tanto de fuerzas de fricción como de fuerzas de presión.

Palabras Claves — Riblets, flujo turbulento, arrastre por fricción, fuerzas de fricción, fuerzas de presión.

I. INTRODUCCIÓN

EL estudio de la reducción del arrastre aerodinámico mediante modificaciones en la capa límite turbulenta resulta ser un tema clásico en el estudio de la mecánica de fluidos contemporánea. Dependiendo de sus aplicaciones, diferentes métodos se han ido desarrollando a lo largo del tiempo con el objetivo de disminuir las pérdidas energéticas llevada a cabo dentro de ésta pequeña, pero significativa, energéticamente hablando, región de flujo. Una de estas aplicaciones entre los medios de transporte, son los automóviles. A partir del primer vehículo fabricado

por una línea de producción masiva en 1908, intrínsecamente ligados a la evolución de nuevos y diversos métodos de manufactura y ensamble de materiales, se han aplicado cambios en sus geometrías con la finalidad de que éstos tengan menores coeficientes de arrastre al ser mas aerodinámicos y por ende, más rápidos, fáciles de manejar y económicos en lo que al consumo de combustible concierne. Actualmente, se ha alcanzado un punto máximo en la aerodinámica vehicular, es decir, los cambios geométricos obedecen más a aspectos estéticos relacionados con la venta de vehículos, que a consideraciones relacionadas al arrastre, puesto que

teóricamente se ha determinado que el límite óptimo aerodinámico es similar a un ala de avión invertida [1].

Con respecto al transporte de fluidos en tuberías, desde 1940 se lleva a cabo la implementación de la adición de polímeros y surfactantes al petróleo crudo y sus derivados por distintas compañías petroleras. Lo interesante de este método es que con concentraciones que van desde unas pocas partes por millón, se han logrado reducciones del arrastre de hasta el 40%, explicándose el efecto reductor de manera similar a una gota de tinta china que tiñe de negro un vaso grande de agua [2]. Sin embargo, debido principalmente a que resulta ser un método intrusivo y al problema de la degradación, su aplicación se ha limitado a cierto tipo de sustancias en la industria petrolera.

En 1970, McCormick y Bhattacharyya obtuvieron una reducción del arrastre del 30% en un cuerpo axisimétrico alineado en dirección de la corriente. Ellos enredaron un alambre de cobre en el cuerpo y produjeron microburbujas en zonas cercanas a la capa límite mediante electrólisis [3].

A partir de aquella investigación, este tema ha sido ampliamente estudiado y tratado de implementar principalmente como medio de disminución del arrastre en vehículos navales. Sin embargo, aún continúan sin resolverse problemas como el tamaño óptimo de las microburbujas y la medición e inyección de éstas dentro de la subcapa de amortiguamiento, pues es la zona en donde bajo condiciones experimentales, el efecto de reducción del arrastre ha probado ser mayor. Además, siendo un método intrusivo, ciertos detalles como la cavitación en los impelentes de las naves, así como el impacto de la salinidad del agua en los sistemas de inyección, continúan siendo un obstáculo para una implementación tecnológica a gran escala.

En 1980, Walsh [4], basándose en las geometrías y dimensiones que presentaban a nivel microscópico las pieles de distintos animales acuáticos, tales como tiburones, leones de mar, entre otros, diseñó réplicas geométricas de los pelajes a los que les llamó riblets y los dispuso en una placa plana. Él estudió la configuración de la capa límite turbulenta y reportó una reducción del arrastre del 8%. Proyecciones realizadas por Bechert et al [5], muestran que se podría reducir el arrastre neto en un avión en hasta un 3%, ya considerando diversos factores como el peso de los riblets, zonas óptimas de funcionamiento en la aeronave, etcétera.

Desafortunadamente, aún hoy en día, la dificultad de manufacturar riblets de tamaño microscópicos con espaciamientos que van desde 30 μ m hasta 70 μ m de separación para aplicaciones aeronáuticas resulta ser una dificultad, que aunada a los requerimientos de resistencia y

durabilidad del material ha ocasionado que aun no sean aplicados a vehículos a gran escala [6].

Si bien todos los métodos anteriormente señalados y otros que aún se encuentran en etapas de desarrollo (actuadores microelectrónicos, generadores de vórtices para vehículos terrestres, paredes oscilantes, etcétera) tienen sus debilidades o han mostrado carencias al implementarse tecnológicamente en sistemas convencionales, es importante señalar que desde finales del siglo XX y principios del siglo XXI, el tema de la reducción en el consumo de energía de los sistemas y procesos industriales, ha tomado gran relevancia a nivel mundial. Esto se debe principalmente a dos factores. Uno de ellos resultan ser los altos precios del petróleo cuyos derivados son usados como fuente primaria de energía por la mayoría de procesos industriales, y que representan gran parte del costo final del producto. El otro son los graves problemas ecológicos que conlleva su consumo, del cual el más acentuado actualmente es la emisión de contaminantes causantes del calentamiento global.

Datos revelados por Wood indican que aproximadamente el 25% de la energía consumida en los Estados Unidos se usa para vencer el arrastre aerodinámico. De la cual, el 16% recae en los diferentes medios de transporte (vehículos terrestres, marítimos, aéreos) [7], y el 9% restante está relacionado con el consumo eléctrico de los equipos de bombeo industriales y residenciales. Es por eso que la implementación de tecnologías de reducción del arrastre a los distintos medios de transporte o sistemas de bombeo, representan ahorros de miles de millones de dólares anuales, y por ende, siendo que el tema de la reducción del arrastre turbulento no es nuevo, ha retomado un nuevo auge mundial debido a la gran cantidad de dinero que podría ser ahorrado.

Ahora bien, los riblets son un método pasivo para la reducción de las fuerzas de arrastre de un flujo turbulento. Consisten en una serie de pequeñas protuberancias geométricas (en forma de canaletas) alineadas en dirección del flujo y dispuestas a lo largo de una superficie de tal manera que le proporcionan rugosidad anisotrópica, admiten pequeños desalineamientos, y pueden tener diferentes secciones transversales (forma de "U", "V", sinusoidales, semicírculos, vellos, escalón, trapezoidales, etcétera). Un esquema ilustrativo de los riblets es mostrado en la figura 1.

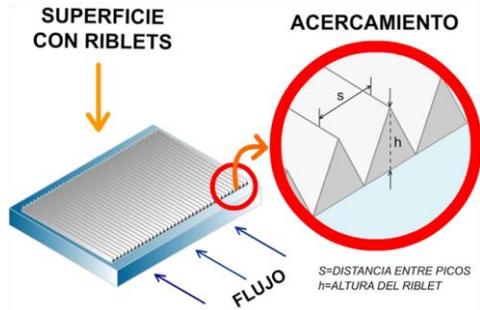


Fig. 1. Corte transversal de una superficie con riblets en forma de v.

II. MODELADO GEOMÉTRICO DE LOS RIBLETS.

Su modelado geométrico resulta ser poco complicado. Consiste en dos longitudes características, la altura del riblet “h” y el espaciamento entre bordes “s”, que para motivos de análisis son adimensionalizados mediante las ecuaciones 1 y 2. La tabla 1 muestra diferentes secciones transversales de riblets utilizadas en distintas investigaciones, así como sus dimensiones en escala real.

$$s^+ = su^*/\nu \tag{1}$$

$$h^+ = hu^*/\nu \tag{2}$$

Al término u^* de 1 y 2, se le conoce como velocidad de fricción y está definido mediante la ecuación 3.

$$u^* = \sqrt{\tau_w/\rho} \tag{3}$$

Siendo “ ν ” y “ ρ ” la viscosidad cinemática y densidad del fluido en condiciones experimentales, y τ_w el esfuerzo cortante máximo del fluido (esfuerzo cortante en la pared). Éste término es determinado experimentalmente mediante el empleo de la ecuación 4 usando métodos como la anemometría de hilo caliente, anemometría de láser Doppler, transductores de presión o velocimetría de imágenes de partículas.

$$\tau_w = \mu \left. \frac{d\bar{u}}{dy} \right|_{y=0} \tag{4}$$

Siendo “ \bar{u} ” la velocidad promedio leída en el punto más cercano a la pared, y “ μ ” la viscosidad dinámica del fluido

Siendo “ \bar{u} ” la velocidad promedio leída en el punto más cercano a la pared, y “ μ ” la viscosidad dinámica del fluido

TABLA I. Tamaños a escala real de los riblets.

Autor	Sección Transversal	h(mm)	s(mm)
Walsh J.		0.25	0.5
Walsh J.		0.5	0.5
Kwing S.		2.5	1.6
Grek G.		0.75	1
Lee S.		1.5	3
Hee Chang L.		1.5	3
Saitou T.		1.73	2
Main H.		0.18	0.3

La medición del arrastre por fricción promediado espacialmente es obtenida mediante la integral del producto del esfuerzo cortante en la pared por el área diferencial mojada, como es mostrado en las ecuaciones 5 y 6. Siendo D_p el arrastre por fricción promedio de la placa plana y D_r el arrastre por fricción promedio de los riblets.

$$D_p = \mu \int_{A_p} \frac{\partial u}{\partial n} dA_p \tag{5}$$

$$D_r = \mu \int_{A_r} \frac{\partial u}{\partial n} dA_r \tag{6}$$

Siendo μ la viscosidad dinámica del fluido estudiado, “n” la coordenada normal a la superficie, y A_r y A_f las áreas mojadas por los riblets y por la placa plana respectivamente.

Debido a las diferencias geométricas de una superficie con riblets con respecto a una placa plana, se infiere que para una superficie con riblets, se podrán obtener “n” perfiles de velocidades originados en “n” posiciones en la pared del riblet. Por lo anterior, es necesario definir la posición de un único origen que nos permita comparar los datos de velocidad obtenidos de la superficie con riblets con los de una placa plana de manera que los resultados arrojen información lo suficientemente significativa para establecer conclusiones.

En muchos estudios experimentales, el origen virtual es posicionado en la punta del riblet, el valle del riblet, o el punto medio entre el origen y el valle, en otros, se hace un barrido (velocimetría mediante láser Doppler) a lo largo de varias posiciones de la coordenada “y”, y se utiliza como origen virtual aquella coordenada que mas ajuste el perfil de velocidad obtenido con aquello medido en una placa plana. [8]

Sin embargo, el método que parece ser el más adecuado es descrito por Haecheon et al; [9] mediante la ecuación 7.

$$y_0 = y_m - \frac{13\nu}{u_r^*} \quad (7)$$

Siendo y_0 la posición del origen virtual, y_m la coordenada con la mayor producción de energía cinética turbulenta (o donde ocurre la mayor fluctuación de velocidad en la dirección a la corriente) y u_r^* la velocidad de fricción de la superficie con riblets definido mediante la ecuación 8.

$$u_r^* = \left[\left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)_r \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Como anteriormente fue mencionado, el pionero de esta línea de investigación fue Walsh, quien en 1983, investigó superficies con riblets de diferente tipo y encontró que la reducción de las fuerzas de arrastre ocurren cuando las dimensiones geométricas de los riblets medidas en unidades de la pared tienen $s^+ < 30$ y $h^+ < 25$ (para riblets en forma de V, con $s=0.5\text{mm}$ y $h=0.25\text{mm}$) y de $s^+ < 16$ y $h^+ < 8$ y para riblets en forma de U ($s=0.5\text{mm}$ y $h=0.25\text{mm}$).

Kwing So [10], en 1987 realizó un estudio utilizando la anemometría de hilo caliente comparando las estructuras de flujo sobre una placa plana con y sin riblets en formas de canaletas con $s^+=13$ y $h^+=20$. Obtuvo una reducción del 3% en el coeficiente de arrastre y reportó el ajuste vertical en el perfil de velocidades de la pared, así como el reposicionamiento vertical de los vórtices en posiciones más alejadas a la pared con respecto al caso de una placa sin riblets. Destacó el hecho de que aunque los riblets son geometrías de pequeña escala, afectan la secuencia de formación de vórtices a gran escala, y restringen sus movimientos en la coordenada lateral.

Bechert y Bartenwerfer en 1989 estudiaron teóricamente las distribuciones de velocidad para varias configuraciones de riblets. Usaron el concepto de altura de protuberancia para definir la ubicación del origen de la capa límite turbulenta en la superficie del riblet y reportaron que los bordes filosos de los riblets impiden el flujo cruzado instantáneo en la subcapa viscosa, lo que se ve reflejado en una disminución del intercambio de momento en la dirección lateral al flujo.

Hecheon et al; en 1992, realizaron un estudio numérico computacional de una superficie con riblets en forma de "V", mediante el empleo del método de simulación numérica directa (DNS por sus siglas en inglés), y compararon dos espaciamentos $s^+=20$ para el caso de reducción del 6% en el arrastre y $s^+=40$, para el caso de aumento en el coeficiente de arrastre y compararon los parámetros de flujo para los dos casos. Reportaron disminuciones de la vorticidad en los valles de los riblets para el caso de la disminución del arrastre, pero a su vez un aumento de ésta en el caso de $s^+=40$. También, reportaron

disminuciones en los esfuerzos de Reynolds en los 3 componentes espaciales para el caso de la reducción del arrastre, así como una reducción de la intensidad de la turbulencia en los valles de los riblets.

Chu y Karniadakis (1993) simularon el flujo sobre una superficie con riblets en un canal, usando métodos espectrales (método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales que funciona de manera global a diferencia de las diferencias y volúmenes finitos). Ellos obtuvieron una reducción del arrastre de 6% con respecto a una pared lisa. Reportaron que los riblets inhiben el movimiento en dirección lateral de los vórtices de baja velocidad sobre la pared, disminuyendo los eventos rotacionales, ocasionando un efecto de soplado en el riblet, que afecta el intercambio de momento a lo largo de toda la superficie cercana a la pared [11].

Grek et al; en 1995, estudiaron mediante la técnica anemometría de hilo caliente la zona de transición de una placa plana con y sin riblets de forma triangular. Reportaron que los riblets ocasionan retrasos en la formación de vórtices a lo largo de toda la placa, lo que se puede interpretar como un alejamiento del punto de separación del flujo [12].

Lee, en el 2001, estudió el problema mediante la técnica velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV), y reportó que el mecanismo vinculado con la disminución del arrastre está relacionado con el posicionamiento de los vórtices con respecto a la geometría de los riblets. Los mayores efectos se presentaron cuando los vórtices se encontraban sobre las paredes laterales de los riblets, en contraste a la posición de los vórtices para los casos en los que se presentó el efecto contrario. En esos casos adversos, los vórtices mostraron ubicarse dentro de los valles de los riblets.

Mayoral y Jiménez, en el 2008, estudiaron numéricamente el problema, introduciendo un nuevo parámetro que relacionaba el alto y ancho de los riblets con el área transversal la cual denominó como la longitud característica de las superficies con riblets. Este nuevo parámetro, relaciona las propiedades del riblet (el ancho y la altura) con la disminución de los esfuerzos en la pared, lo que permite un mejor análisis del fenómeno.

Una explicación muy convincente del fenómeno de reducción del arrastre fue realizada por Haecheon et al; y se puede explicar como sigue: Debido a que el diámetro promedio de los vórtices en la dirección de la corriente sobre la pared son menores al espaciamento s^+ de los riblets para el caso del aumento del arrastre, los vórtices se pueden posicionar de manera aleatoria dentro de los valles de los riblets, esto expone un área superficial grande a

intercambio de momento, aumentando el valor de las fuerzas de arrastre.

En el caso de la reducción del arrastre, la mayoría de los vórtices en dirección de la corriente se quedan arriba de los riblets debido a que su diámetro es mayor que el espaciado de los riblets, y sólo un área limitada del riblet intercambia energía con el vórtice, en otras palabras, sólo una pequeña área del riblet es mojada por los vórtices, lo que induce a una reducción del arrastre neto (figura 2).

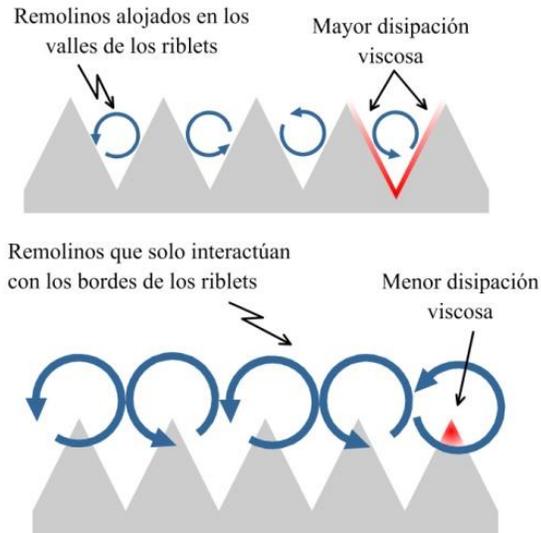


Fig. 2. Mecanismo reductor del arrastre propuesto por Haecheon et al.

Ésta difiere a la planteada por Bechert y Bartenwerfer quienes explican el mecanismo de la siguiente manera: El fuerte intercambio de momento de la capa límite turbulenta es producida por un mecanismo repetitivo en el que paquetes de fluido en forma de remolino que se mueven a alta velocidad y que se acercan a la pared, interactúan con paquetes de fluido que se encuentra a una velocidad menor, ocasionando una disipación energética acentuada en zonas cercanas a la pared. Este intercambio de momento en la superficie aumenta la magnitud del esfuerzo cortante del flujo turbulento. Resulta obvio que las interacciones locales entre paquetes de fluido de alta y baja velocidad ocasionan un movimiento del flujo en la dirección lateral. Entonces, mediante la utilización de riblets alineados con la corriente se pueden restringir esos movimientos laterales, y con ello, ocasionar modificaciones en el ciclo repetitivo de disipación viscosa, consiguiendo finalmente una reducción en el arrastre.

Los bordes de los riblets inhiben el movimiento lateral del flujo

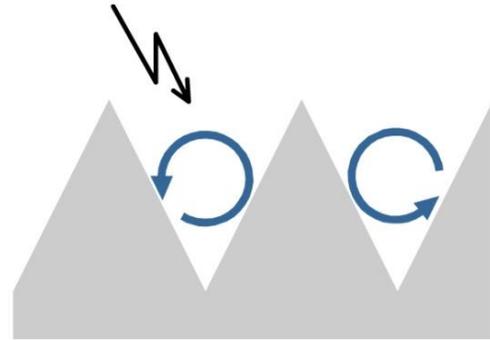


Fig. 3. Mecanismo reductor del arrastre propuesto por Bechert et al.

PANORAMA ACTUAL DEL FENÓMENO Y FUTURAS APLICACIONES

Aunque las descripciones anteriores son las que mejor parecen explicar el comportamiento del mecanismo reductor del arrastre, estas resultan ser muy simplistas y hasta contradictorias con respecto al posicionamiento de los vórtices en relación al espaciado entre riblets (s^+).

Por otra parte, aunque están suficientemente documentados los parámetros de flujo afectados por el uso de riblets cuando existe una reducción de la fricción, y es conocido el hecho que la altura del riblet debe de ser del orden de la subcapa viscosa, y el espaciado óptimo debe de estar en el intervalo $10 < s^+ < 20$ [4,8], estos parámetros resultan ser limitados para describir las distintas secciones transversales posibles que pueden ser evaluadas.

Además, la mayor parte de los experimentos realizados, muestran que la teoría fundamental que estudia el comportamiento de los riblets está basada en el estudio de un coeficiente de arrastre enteramente dependiente de las fuerzas de fricción debido a la condición de no deslizamiento que existe en las paredes de las placas planas estudiadas.

Un enfoque interesante de éste fenómeno, sería el obtenido al estudiar los efectos de los riblets sobre las superficies de un cuerpo romo (cilíndrico), ya que su coeficiente de arrastre depende tanto de las fuerzas de presión, como de las fuerzas de fricción.

Entre los pocos investigadores que han estudiado este fenómeno puede citarse a Chang et al; quienes en el 2002, realizaron un experimento comparativo entre un cilindro con y sin riblets para un intervalo de números de Reynolds de 8×10^3 y 1.4×10^5 [13]. Mostraron que se puede reducir

el arrastre sobre un cilindro en hasta el 18.6% usando riblets del tipo U con $s=1.5\text{mm}$ y $h=1.5\text{mm}$, mientras que para riblets del tipo V ($s=1.5\text{mm}$, $h=1.5\text{mm}$), del reducción del 2.5%. Esta investigación resulta ser muy importante debido a que se logró reproducir el fenómeno utilizando riblets mucho más grandes que los convencionales. También, las ganancias en la reducción del arrastre fueron significativamente más elevadas que las obtenidas para el caso de una placa plana.

Manhee et al; en el 2003 [14], investigaron el flujo turbulento primero sobre un alerón, y un cilindro, utilizando riblets del tipo V, con espaciamentos de $h=180\mu\text{m}$ y $s=300\mu\text{m}$. También reportaron un procedimiento relativamente simple y económico para fabricar riblets de tipo “V”. Ellos utilizaron un proceso químico en el cual ciertas sustancias se le añadieron a un silicón base, y mediante diversos procesos de horneado y secado, se formaban los riblets sobre una cinta adhesiva capaz de adherirse a superficies curvas, planas etc. Reportaron una disminución del arrastre que oscilaron entre el 3.5% y 4.3% para el caso del alerón, mientras que para el cilindro, obtuvieron una reducción del arrastre máxima del 6%.

Aunque se ha empezado a estudiar la presencia de riblets en cuerpos no aerodinámicos (el cilindro es la geometría clásica para el estudio de un cuerpo no aerodinámico), debido a la complejidad y a la gran cantidad de variables involucradas en el estudio del flujo externo turbulento sobre un cilindro, los resultados de los autores anteriormente mencionados resultaron incompletos en lo que concierne a parámetros de flujo como esfuerzos de Reynolds, mapas de vorticidad, puntos de separación, distribuciones de velocidad acimutales, modos de vibraciones, secuencias de formación de vórtices etcétera.

III. CONCLUSIONES

Los riblets resultan ser un método clásico de la reducción del arrastre, y su comportamiento sobre una placa plana ha sido estudiado ya casi por 3 décadas, pero su efecto reductor de la fricción actualmente encuentra más aplicaciones en cuerpos no aerodinámicos, en donde las fuerzas de arrastre dependen de las fuerzas tanto de fricción en la superficie del objeto, como de las fuerzas de presión debido a los gradientes entre la parte delantera y posterior del cuerpo, que forman una estela debido a la separación del flujo. Más aún resulta interesante que para este tipo de geometrías, el tamaño de los riblets puede ser significativamente mayor y no parece ser impedimento para una aplicación funcional, lo que abre la puerta a una gran gama de métodos de manufactura convencionales que se pudieran aplicar para fabricarlos. Sin embargo, la comprensión del fenómeno para este tipo de geometrías resulta ser aún limitada, y quedan grandes vacíos que

habrán de ser llenados en las próximas décadas para poder lograr una aplicación tecnológica óptima que suponga un ahorro sustancial en energía consumida y materiales de construcción en máquinas como vehículos (aéreos, marítimos y terrestres), soportes de plataformas de perforación petrolera de aguas profundas, edificios, soportes de turbinas eólicas, intercambiadores de calor etc

IV. REFERENCIAS

- [1] White M. (2008) “Fluid Mechanics”. 6TH Edición, Ed. Prentice Hall Libro. Ch. 7. P.P. 483-486.
- [2] Slaheddine K. (2005) “Expanding applications of viscoelastic surfactants”. Oilfield Review. P.P. 10-24.
- [3] McCormick M, Bhattacharyya R, “Drag reduction of a submersible hull by electrolysis”. Naval engineers Journal. P.P: 11-16. 1973.
- [4] Walsh M.J. (1982) “Turbulent boundary layer drag reduction using riblets”. 20th Aerospace Sciences Meeting. AIAA. P.P.1-9.
- [5] Becher D.W; Bartenwerfer W. (1989) “The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs”. Journal of fluid mechanics. Vol. 206. P.P. 105-129.
- [6] Mayoral R; Jimenez J. (2008) “Physical mechanism of the turbulent drag reduction in riblet-like surfaces”. European drag reduction and control meeting.
- [7] Wood M. (2004) “Impact of advanced aerodynamic technology on transport energy consumption”. S.A.E.
- [8] Lee S; Lee J. (2001) “Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface”. Experiments in fluids. Vol. 30. P.P. 153-166.
- [9] Haecheon C. (1993) “Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets” Journal of fluid mechanics, Vol. 277. P.P. 505-539.
- [10] Kwing So C. (1989) “Near wall structure of a turbulent boundary layer with riblets”. Journal of fluid mechanics. Vol. 208. P.P. 417-458.
- [11] Chu D.C; Karniadakis G.E. (1993) “A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet mounted surfaces”. Journal of fluid mechanics. Vol. 250. P.P. 1-42.
- [12] Grek G. Kozlov V.V. Titarenko S.V. (1996) “An experimental study of the influence of riblets on transition”. Journal of fluid mechanics. Vol. 315. P.P.31-49.
- [13] Chang H; Lee S.P. (2002) “Flow control of circular cylinders with longitudinal grooved surfaces”. AIAA. Vol.40. P.P.2027-2035.
- [14] Manhee H. Chang L. Seung S.Sang.Joon L. (2003) “Fabrication of a microriblet film and drag reduction effects on curved objects”. 12th international conference on solid state sensors, actuators and Microsystems” IEEE.

Este estudio fue financiado por los autores. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Copyright © 2019 Alejandro Alonzo García, Enrique Chan y Díaz, Claudia Gutiérrez Torres, Oscar Morales Contreras, Antonio Gómez Roa



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales.

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumendelicencia](#) - [Textocompletodelalicencia](#)